

УДК 669.14

Желябов П. А., Кулабухов А. М.

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТОКОВОЙ КАТУШКОЙ В СИСТЕМАХ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Пропонується алгоритм управління кутовим положенням космічного апарату, що дозволяє змінювати кутову орієнтацію по одній координаті з використанням однієї електромагнітної котушки.

Ключові слова: *космічний апарат, електромагнітна система управління орієнтацією і стабілізацією, алгоритм управління.*

Предлагается алгоритм управления угловым положением космического аппарата, позволяющий изменять угловое положение по одной координате с использованием одной электромагнитной катушки.

Ключевые слова: *космический аппарат, электромагнитная система управления ориентацией и стабилизацией, алгоритм управления.*

An algorithm for controlling the angular position of a spacecraft is proposed, which allows to change the angular position along one axis using a single electromagnetic coil.

Key words: *spacecraft, altitude determination and control system, electromagnetic control algorithm, magnetic torque*

Введение

Набор исполнительных приборов современных малых космических аппаратов (КА) обычно включает электромагнитную систему угловой ориентации и стабилизации (СУОС) [1,2]. Основными проблемами электромагнитной СУОС являются малый момент управления и наличие магнитных возмущающих моментов во время измерений параметров магнитного поля Земли, что приводит к относительно невысокой точности стабилизации углового положения КА. Чаще всего она используется для гашения начальных угловых скоростей (ГУС), которые были получены после отделения КА от ракета-носителя (РН) и разгрузки двигателей маховиков (ДМ), после их выхода на гранично-допустимые значения кинетического момента.

Для некоторых сверхмалых КА электромагнитная СУОС является единственной с учетом ее стоимости, простоты и возобновляемой электрической энергия КА.

Управляющий момент определяется как векторное произведение магнитного момента катушки и магнитного поля Земли

$$\vec{M}_{упр} = \vec{B}\vec{H}; \quad (1)$$

где $\vec{M}_{упр}$ – вектор управляющего момента (Нм);

\vec{B} – вектор магнитного момента, создаваемый ЭМ (Ам^2 или Дж/Тл в системе СИ);

\vec{H} – вектор магнитного поля Земли в заданной точке (Тл).

Проекции магнитного поля Земли на оси КА измеряются магнитометром. Соответственно управляющий момент для углового поворота КА создается магнитным моментом катушек. В большинстве случаев для разворота КА и погашения угловых скоростей используются разные алгоритмы, а для случая плоскостного разворота КА используются 2 катушки [1].

Алгоритмы управления различными объектами делят на:

- пропорциональные (П регуляторы);
- пропорционально дифференциальные (ПД регуляторы) [3];
- пропорционально интегрально дифференциальные (ПИД регуляторы).

В пропорциональных регуляторах управляющее воздействие формируется пропорционально отклонению регулируемой величины. Они достаточно просты (требуют только измерения регулируемой величины), но характеризуются значительной ошибкой регулирования и большого времени переходного процесса (слабое затухание переходного процесса).

ПД регуляторы требуют использования двух типов датчиков регулируемой величины и ее производной (например, угла и угловой скорости). Они отличаются от П регуляторов лучшим качеством переходного процесса (меньшей ошибкой в установившемся режиме и меньшем времени переходного процесса).

ПИД регуляторы требуют использования трех типов датчиков регулируемой величины, ее производной и интеграла. Отличаются хорошим качеством регулирования. Однако при регулировании возникает сложность использования датчика, который по отношению к регулируемой величине измеряет ее интеграл. Использование таких регуляторов как правило ограничивается регулированием скоростей.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу использования для плоскостного разворота одной катушки с релейным законом управления, позволяющим, как производить плоскостной разворот КА, так и гасить начальную угловую скорость.

Основными задачами исследования являются:

- получение переходного процесса изменения угла, угловой скорости, магнитного момента и управляющего момента во времени при заданных характеристиках: объекта управления, законов управления, начального отклонения по углу, конечного значения угла в установившемся режиме и нулевой начальной и конечной скорости для различных значений коэффициентов закона управления (задача угловых поворотов КА);

- получение переходного процесса изменения угловой скорости, угла, магнитного момента и управляющего момента по времени при заданных характеристиках: объекта управления, законов управления, нулевого начального и конечного отклонений по углу, ненулевой начальной и нулевой конечной скорости для различных значений коэффициентов закона управления (задача погашения начальных угловых скоростей КА);

- оценка влияние коэффициентов закона управления на энергопотребление, качество и время переходного процесса;

- экспериментальная проверка полученных результатов на стенде.

В связи с тем, что экспериментальная установка [6] позволяет осуществлять движение только в одной плоскости (горизонтальной) с малым трения, будем рассматривать плоскостное движение КА без возмущающих воздействий под действием электромагнитов (ЭМ) в инерциальной системе координат с учетом неподвижности установки в магнитной поле Земли.

Угловое движение в инерциальной системе координат описывается выражением

$$J_z \dot{\omega}_z = M_{упр} + \sum_{i=0}^n M_{ei}; \quad (2)$$

где J_z – момент инерции подвижной части установки относительно вертикальной оси (ось z) при исследовании на экспериментальной установке или момент инерции КА при моделировании движения КА;

$\dot{\omega}_z$ – угловое ускорение установки (или КА) относительно вертикальной оси;

$M_{упр}$ – управляющий момент, создаваемый ЭМ относительно вертикальной оси;

M_{ei} – возмущающие моменты относительно вертикальной оси;

n – количество возмущающих моментов.

Предположим, что возмущающие моменты (моменты трения, моменты от дисбаланса подвижной части, моменты намагничивания металлических материалов) на порядок меньше управляющих моментов. В этом случае

$$J_z \dot{\omega}_z = M_{упр} \quad (3)$$

Решение. Управляющий момент будем формировать за счет изменения магнитного момента ЭМ путем включения его по закону (рис 1)

$$B = \begin{cases} 0 & \text{если } |k_1 \Delta\alpha + k_2 \Delta\dot{\alpha}| \leq \delta \\ B_{max} & \text{если } (k_1 \Delta\alpha + k_2 \Delta\dot{\alpha}) < \delta ; \\ -B_{max} & \text{если } (k_1 \Delta\alpha + k_2 \Delta\dot{\alpha}) > \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta = k_1 \Delta\alpha + k_2 \Delta\dot{\alpha} \quad (5)$$

где $\Delta\alpha = \alpha_\phi - \alpha_{np}$ – рассогласование по углу;

α_{np} – программное (конечное) значение угла;

α_ϕ – фактическое (измеренное значение угла датчиком);

$\Delta\dot{\alpha} = \dot{\alpha}_{np} - \dot{\alpha}_{\phi}$ – рассогласование по скорости;
 $\dot{\alpha}_{np}$ – значение угловой скорости на конечном участке (нулевое значение);
 $\dot{\alpha}_{\phi}$ – фактическое значение угловой скорости (измеренное ДУС)

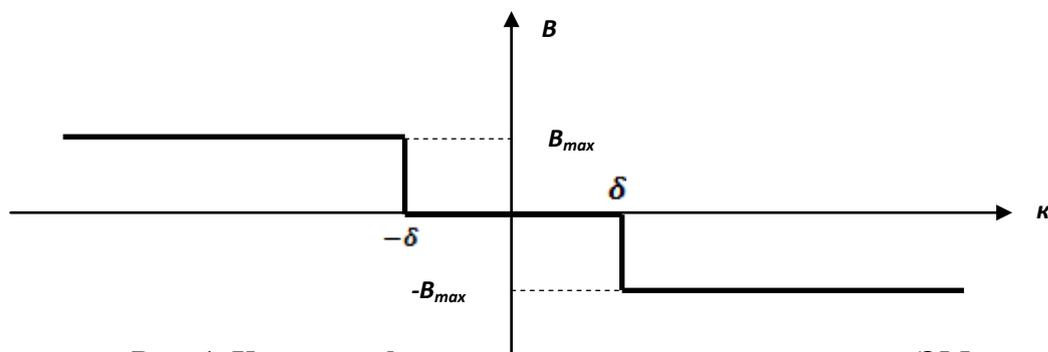


Рис. 1. Характер формирования магнитного момента ЭМ

От выбора коэффициентов k_1 и k_2 зависит качество регулирования. При этом следует учитывать, что ЭМ не может обеспечивать магнитный момент больше заданного при максимальном токе (напряжении) на катушке, т.е. величины B_{max} .

Для программных разворотов в соответствии с выражением (4) регулятор представляет собой ПД регулятор.

Математическая модель углового положения разрабатывалась в предположении, что измерительные датчики (магнитометр и датчик угловых скоростей) позволяют определить значение угла и угловой скорости в текущий момент времени [4], а возмущающие моменты отсутствуют.

Математическая модель углового движения представлена в виде

$$\ddot{\alpha} = \frac{M_{упр}}{J} \quad (6)$$

Алгоритм управления

$$M_{упр} = BH \sin \alpha \quad (7)$$

Выбор коэффициентов алгоритма управления с учетом возможностей ЭМ осуществлялся по выражениям

$$k_1 = a * B_{max} / (\frac{\pi}{2}) \text{ [Ам}^2\text{с/рад]}, \quad (8)$$

$$k_2 = b * B_{max} \sqrt{\frac{2J}{\pi BH}} \text{ [Ам}^2\text{с/рад]}; \quad (9)$$

где a и b коэффициенты, распределяющие ресурсы между управлениями по углу и угловой скорости (их сумма равна 1).

Различные варианты величин a и b , использованные при моделировании, приведены в табл. 1

Таблиця 1.
Значення коефіцієнтів ПД регулятора

№	a	b
1	0,7	0,3
2	0,5	0,5
3	0,3	0,7

Исходными данными для моделирования являлись характеристики объекта управления и закона управления, а именно:

- J – момент инерции объекта управления (КА или стенда);
- a, b – коэффициенты, учитывающие распределение ресурсов регулятора;
- δ – параметр чувствительности привода (рис. 2).
- V_{\max} – максимальный магнитный момент ЭМ.

Моделирование углового движения производилось для КА имеющего $J=5,2$ кгм², с установленными на нем ЭМ с магнитным моментом $V_{\max}= 5$ Ам² [5].

Параметр δ варьировался со значениями от 0,1 до 0,5 с шагом 0,1 и от 0,01 до 0,1 с шагом 0,01.

Задание этих условий предполагает изменять чувствительность провода к управлению и влиять на точность стабилизации, время переходного процесса и потребление энергии ЭМ.

В модели предусмотрено как задание начальных, так и конечных условий углового движения, которые должны установиться в процессе стабилизации.

В качестве начальных и конечных условий для осуществления программного разворота задавались условия:

- $\alpha_0 = 90^\circ$;
- $\alpha_k = 0^\circ; 45^\circ$ (повороты на 90 и 45°);
- $\dot{\alpha}_0 = 0$;
- $\dot{\alpha}_k = 0$.

В качестве начальных и конечных условий для моделирования процесса гашения начальной угловой скорости задавались условия:

- $\alpha_0 = 0^\circ$;
- $\alpha_k = 0^\circ$;
- $\dot{\alpha}_0 = \alpha_{\text{зад}}$;
- $\dot{\alpha}_k = 0$,

где значение $\alpha_{\text{зад}}$ варьировалось со значениями, приведенными в табл. 2.

Таблиця 2.
Начальные угловые скорости движения КА

№	$\alpha_{\text{зад}}, \text{град/с}$
1	5
2	10
3	15
4	20

Моделирование производилось для программного разворота на 90° и с 90° до 45° . Результаты моделирования приведены на рис. 2.

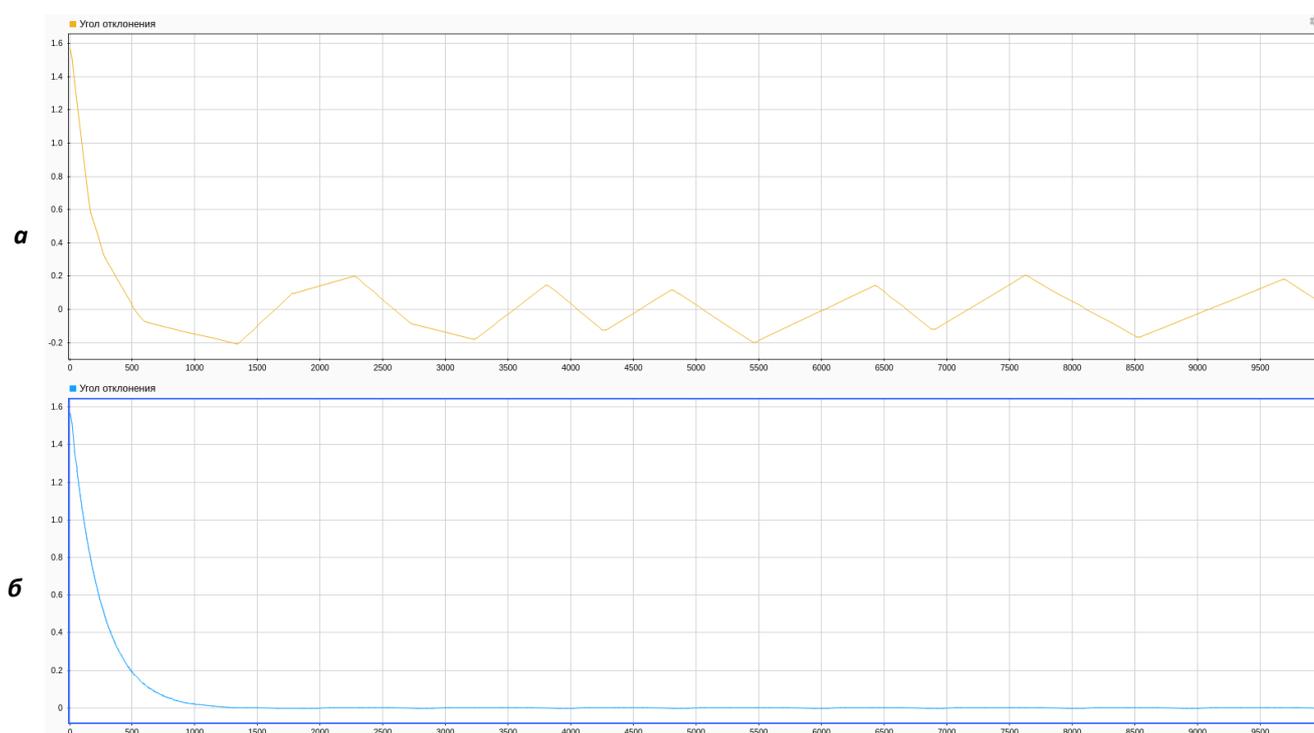


Рис. 2. Переходной процесс изменения угла на 90° при коэффициентах $a = 0.7, b = 0.3$: а) $\delta = 0.5$, б) $\delta = 0.01$

Как видно из графика предложенный алгоритм позволяет осуществлять программный разворот по координате. Качество переходного процесса существенно зависит от параметра δ . При этом время переходного процесса остается практически постоянным.

На рис. 3, 4 приведены результаты моделирования при программном развороте с 90° до 45° .

Как видно из приведенных графиков предлагаемый алгоритм управления одним ЭМ позволяет обеспечивать возможность программного разворота на любой угол при достаточно простом управлении ЭМ в дискретном режиме. Качество управления существенно зависит от δ .

Проводилось исследование возможности использования предлагаемого алгоритма для погашения угловых скоростей. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

Графики показывают, что осуществляется стабилизация не только по скорости, но и по углу. При этом КА до погашения скорости производит 3 полных оборота. Из рис. 4 видно, что при уменьшении δ ошибка стабилизации уменьшается. При этом на время переходного процесса изменение δ практически не влияет.

Графики включения во времени ЭМ, определяющих энергетические затраты на управление, приведены на рис. 6, 7.

Как видно из результатов моделирования при меньшем значении δ ошибка стабилизации уменьшается за счет более частого включения ЭМ. Время включенного состояния ЭМ при больших и малых значениях δ практически одинаковое.

Выбор одной из двух катушек для плоскостного разворота осуществляется той катушкой, вектор магнитного момента которой имеет больший угол по отношению к вектору магнитного поля Земли.

Для оценки адекватности процессов моделирования реальному процессу планируется провести экспериментальное исследование на стенде ориентации и стабилизации [6].

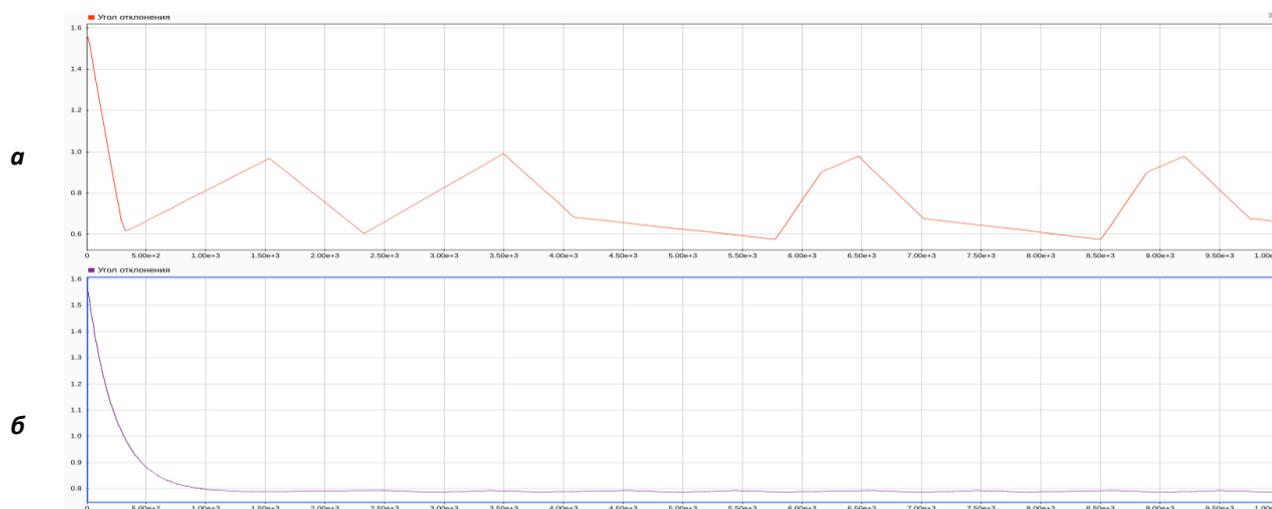


Рис.3. Переходной процесс изменения угла с 90° до 45° при коэффициентах $a = 0.7$, $b = 0.3$: а) $\delta = 0.5$, б) $\delta = 0.01$

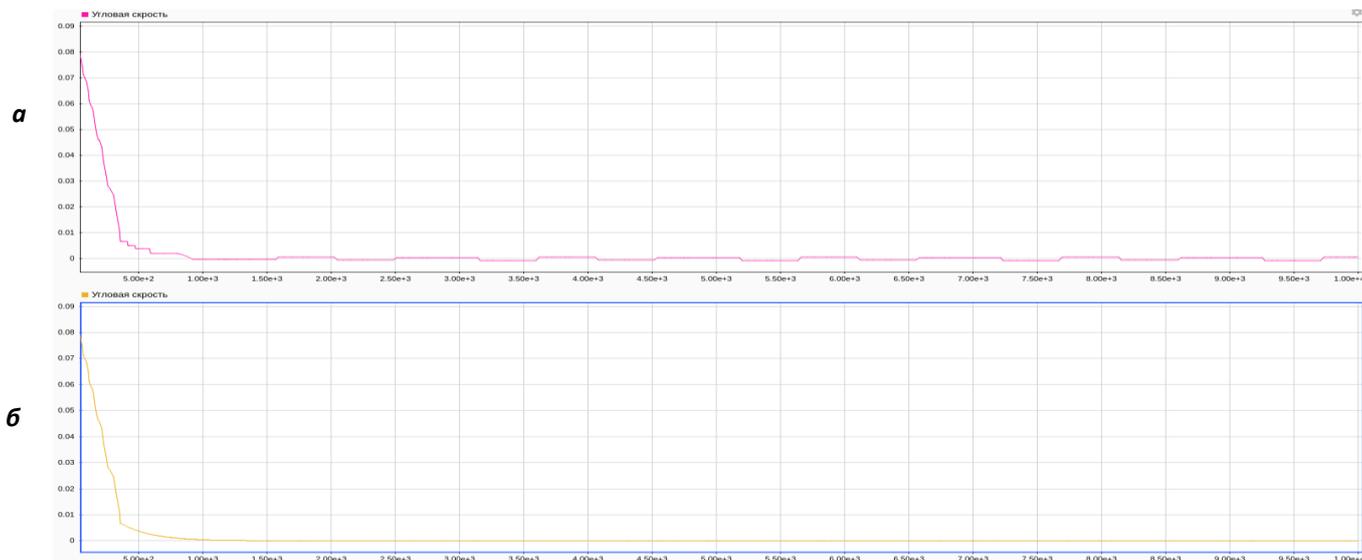


Рис. 4. Переходной процесс изменения скорости при коэффициентах $a = 0.7, b = 0.3$: а) $\delta = 0.5$, б) $\delta = 0.01$



Рис. 5. Переходной процесс изменения угла при начальной угловой скорости 5 град/с с коэффициентами $a=0.7, b=0.3$: а) $\delta = 0.5$, б) $\delta = 0.01$

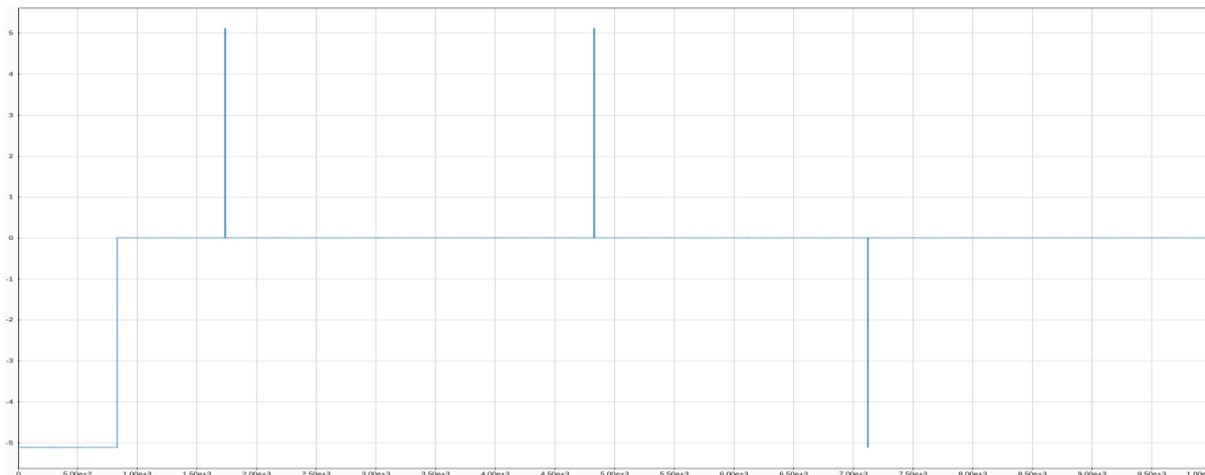


Рис. 6. График включения ЭМ при $\delta = 0.5$.

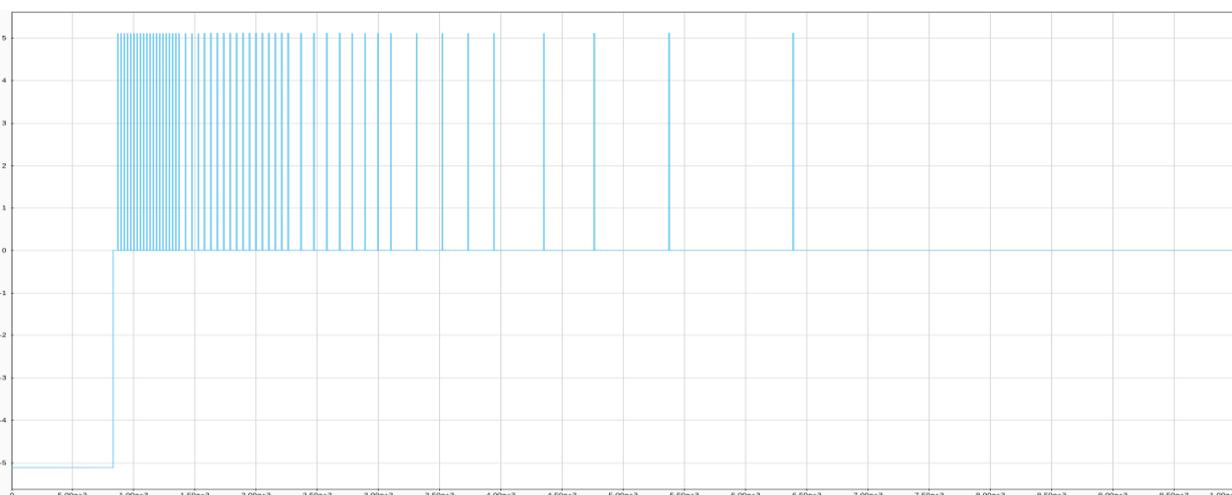


Рис. 7. График включения ЭМ при $\delta = 0.01$

Выводы. Предложен единый алгоритм управления с помощью одной катушки как для плоскостного разворота, так и для погашения угловых скоростей с достаточно простой реализацией, обеспечивающий приемлемое качество переходных процессов.

При реализации алгоритма для углового поворота и погашения начальных угловых скоростей целесообразно перераспределять ресурсы между управления угловым поворотом и угловой скоростью за счет изменения коэффициентов a и b .

Результаты моделирования показали, что от параметра δ закона управления существенно зависит качество переходного процесса, в то время как на время переходного процесса величина δ не влияет, однако при ее уменьшении существенно увеличивается количество переключений ЭМ.

Адекватность процессов моделирования реальному процессу планируется осуществить путем проведения эксперимента на разработанном стенде ориентации и стабилизации.

Библиографические ссылки

1. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст]: учебник / Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев и др./ под общ. ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП Хартрон-Аркос, 2012. – 680 с.
2. Eickhoff, J. The FLP Microsatellite Platform // Flight Operations Manual // Jens Eickhoff. — Springer International Publishing. — Switzerland. — 2016. — Paragraph 7.8. — p. 204.
3. Маштаков Я.В., Ткачев С.С. Влияние возмущений на точность стабилизации спутника ДЗЗ // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. No 18. 31 с. doi:10.20948/prepr-2016-18 URL:
<http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-18>
4. Лабораторные испытания алгоритмов управления ориентацией микроспутника 'Чибиc-М' / Д.С.Иванов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. No 40. 29 с. URL:
<http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-40>
5. Иванов Д.С., Карпенко С.О. Овчинников М.Ю. Лабораторные испытания токовых катушек с сердечником // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. No 29. 26 с. URL:
<http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-29>
6. Тищенко А. В. Испытательный стенд системы угловой ориентации и стабилизации космического аппарата / А. В. Тищенко, О. Г. Клочков, А. М. Кулабухов, В. А. Масальский // Вісник Дніпропетровського університету. Серія : Ракетно-космічна техніка. - 2016. - Т. 24, вип. 19. - С. 140-145. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdurkt_2016_24_19_21.